



# ANÁLISE DE FALHA DO EIXO MOTOR DA CAÇAMBA 1PA11

Omar Maluf<sup>2</sup>

Jéferson Aparecido Moreto<sup>3</sup>

Rosamel Melita Muñoz Riofano<sup>4</sup>

Jair Valfré<sup>5</sup>

Marcelo Tadeu Milan<sup>6</sup>

## Resumo

O presente trabalho teve por objetivo investigar as possíveis causas de falha ocorrida no eixo do motor de uma roda de caçamba. O trabalho seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas, incluindo análise visual do componente, macrodureza B, microscopia óptica, impacto Charpy e tração. O material apresentou composição química compatível com o aço SAE 1040. A análise micrográfica óptica mostrou uma microestrutura consistindo de ferrita e perlita. Os valores de dureza, de resistência mecânica, ductilidade e de resistência ao impacto são inferiores aos valores de referência tipicamente encontrados para o aço SAE 1040 na condição normalizada devido à grande presença de defeitos no material. Conclui-se que a falha do eixo ocorreu por um processo de nucleação e propagação de trinca por fadiga, a partir do raio de concordância do eixo.

**Palavras-chave:** Eixo; Fadiga; Nucleação; Propagação de trinca.

## FAILURE ANALYSIS OF A BUCKET MOTOR SHAFT

### Abstract

The main aim of this work was to investigate the possible causes of failure occurred in a bucket motor shaft. The work followed the usual methodology employed in failure analysis, including visual analysis, Rockwell B macrohardness, optical microscopy, Charpy impact and tensile tests. The material presented chemical composition compatible with the SAE 1040. The optical micrographic analysis showed a microstructure consisting of ferrite and perlite. The values of hardness, strength, ductility and impact strength are lower than the reference values typically found for the SAE 1040 steel in normalized condition due to the large presence of defects in the material. It was concluded that the failure of the shaft occurred due to nucleation and propagation of fatigue cracks from the fillet radius of the shaft.

**Key-words:** Shaft; Fatigue; Nucleation; Crack propagation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Diretor Comercial MIB - Materials Institute of Brazil. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. omar@mib.eng.br

<sup>3</sup> Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos-SP. Jmoreto@sc.usp.br

<sup>4</sup> PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP). Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Pq. Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos-SP. romemuri@sc.usp.br

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico do Departamento de Gestão Estratégica da Vale. DIPE/GEEIP/GAMAPA. Engenharia de Materiais, Prédio Oficina Elétrica, Térreo, Av. Dante Michelini, 5500, Ponta de Tubarão, 29090-900, Vitória-ES. jair.valfre@vale.com

<sup>6</sup> PhD em Ciência e Engenharia de Materiais, Diretor Superintendente MIB - Materials Institute of Brazil. Rua Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 881, Jd. Bethânia, 13561-060, São Carlos-SP. milan@mib.eng.br

## 1 INTRODUÇÃO

Este artigo trata de Análise de Falhas do eixo motor da caçamba 1PA11. A metodologia de Análise do Tipo e Efeito de Falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), é uma metodologia que objetiva avaliar e minimizar riscos por meio da análise das possíveis falhas (determinação da causa, efeito e risco de cada tipo de falha) e implantação de ações para aumentar a confiabilidade. O principal objetivo da análise de falhas é evitar novas falhas. A investigação deve determinar as causas básicas da falha e essa informação deve ser utilizada para permitir a introdução de ações corretivas e/ou preventivas que impeçam a recorrência do problema.

Esta dimensão da qualidade, a confiabilidade, tem se tornado cada vez mais importante para os consumidores, pois, a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada pelo serviço de assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, causa, no mínimo, uma insatisfação ao consumidor ao privá-lo do uso do produto por determinado tempo. Além disso, cada vez mais são lançados produtos em que determinados tipos de falhas podem ter conseqüências drásticas para o consumidor.

A função do componente ou do equipamento deve ser considerada na análise, uma vez que conceituamos falha como a ocasião em que o componente ou equipamento não é mais capaz de executar a sua função com segurança. Analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar porque ele não mais executa sua função com segurança.

Uma análise de falhas que não serve de subsídio para um conjunto de ações corretivas tem utilidade nula. Por outro lado, se não for possível determinar as causas físicas da falha não será possível introduzir melhorias no sistema.

O eixo é fabricado com aço SAE 1040 e acopla-se a um motor que aciona um sistema de caçamba possuindo um diâmetro total de 95 mm. A região fraturada apresenta um diâmetro aproximado de 80 mm.

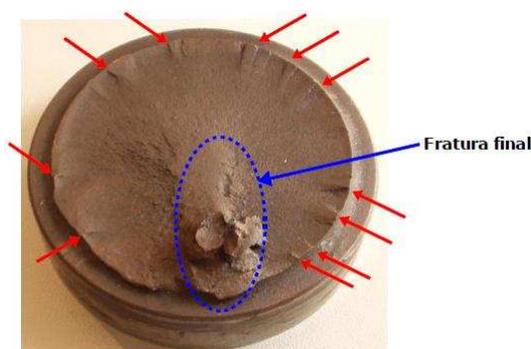
## 2 EXPERIMENTAL

Foi realizada uma inspeção visual do componente (limpeza, registro fotográfico e identificação dos aspectos de falha). A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica por centelhamento. Foram efetuados ensaios de dureza na escala Rockwell B, utilizando uma carga de 100 Kgf, penetrador esférico. Ensaios de impacto Charpy tipo A foram realizados de acordo com a norma ASTM E-23<sup>(1)</sup> em temperatura ambiente utilizando uma máquina Time JB 300 e martelo de 150J. Os ensaios de tração foram realizados em ar e à temperatura ambiente em uma máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), com uma velocidade de 0,5 mm/min (até  $\sigma_{0,2}$ ) e 2 mm/min (até a fratura) de acordo com a norma ASTM A370.<sup>(2)</sup> As análises microestruturais foram realizadas via Microscopia Ótica (MO). As amostras foram preparadas utilizando-se a técnica convencional (lixamento + polimento). O ataque químico utilizado foi nital 2%.

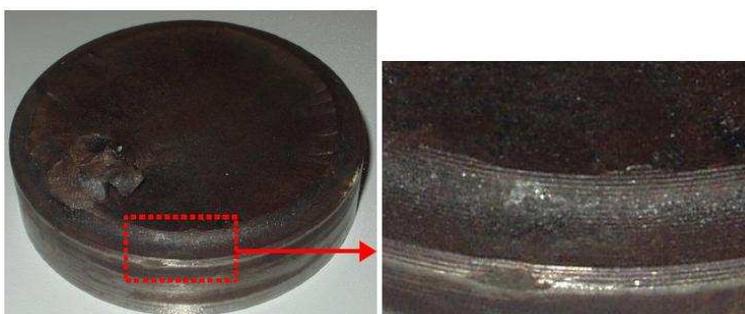
### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise Macrográfica

A análise macrográfica da amostra (Figura 1), revela a presença de inúmeras marcas de catraca (setas), indicando múltiplos sítios de nucleação de trinca por fadiga. As trincas nuclearam junto ao raio de concordância do eixo, onde se observam marcas profundas de usinagem na superfície que aumentam significativamente a concentração de tensão nesta região. A Figura 2 mostra detalhes das marcas de usinagem na superfície do eixo, junto ao raio de concordância.



**Figura 1.** Detalhes da análise macrográfica do eixo fraturado. As setas vermelhas indicam a presença de “marcas de catraca”.



**Figura 2.** Detalhe das marcas de usinagem na superfície do eixo, junto ao raio de concordância.

#### 3.2 Análise Química

De acordo com os resultados de análise química, Tabela 1, pode-se afirmar que o material apresenta composição química dentro dos valores especificados para o aço SAE 1040.

**Tabela 1 - Análise química (% em peso)**

Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Fe
09-0015	0,38	0,22	0,87	0,018	0,048	0,09	0,06	0,02	ND	0,003	Bal
<b>SAE 1040</b>	0,37- 0,44	-	0,60- 0,90	0,040 Máx	0,050 máx	-	-	-	-	-	Bal

ND - Não Detectado

### 3.3 Análise de Dureza

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de dureza

Amostra	Medidas (HRB)					Média (HRB)	Média (HB)*	SAE 1040 normalizado 900°C
09-0015	88	88	88	89	89	88,4	176	170

\* Conversão feita de acordo com a norma ASTM A370 para fins de comparação

### 3.4 Análise Micrográfica Óptica

A micrografia óptica revelou uma grande quantidade de defeitos (vazios) e diversas inclusões alongadas de MnS, paralelamente ao comprimento do eixo (Figura 3a). A microestrutura consiste de ferrita e perlita, típica de um aço médio carbono na condição normalizada (Figura 3b). Os picos e vales resultantes do processo de usinagem no raio de concordância são claramente identificados.

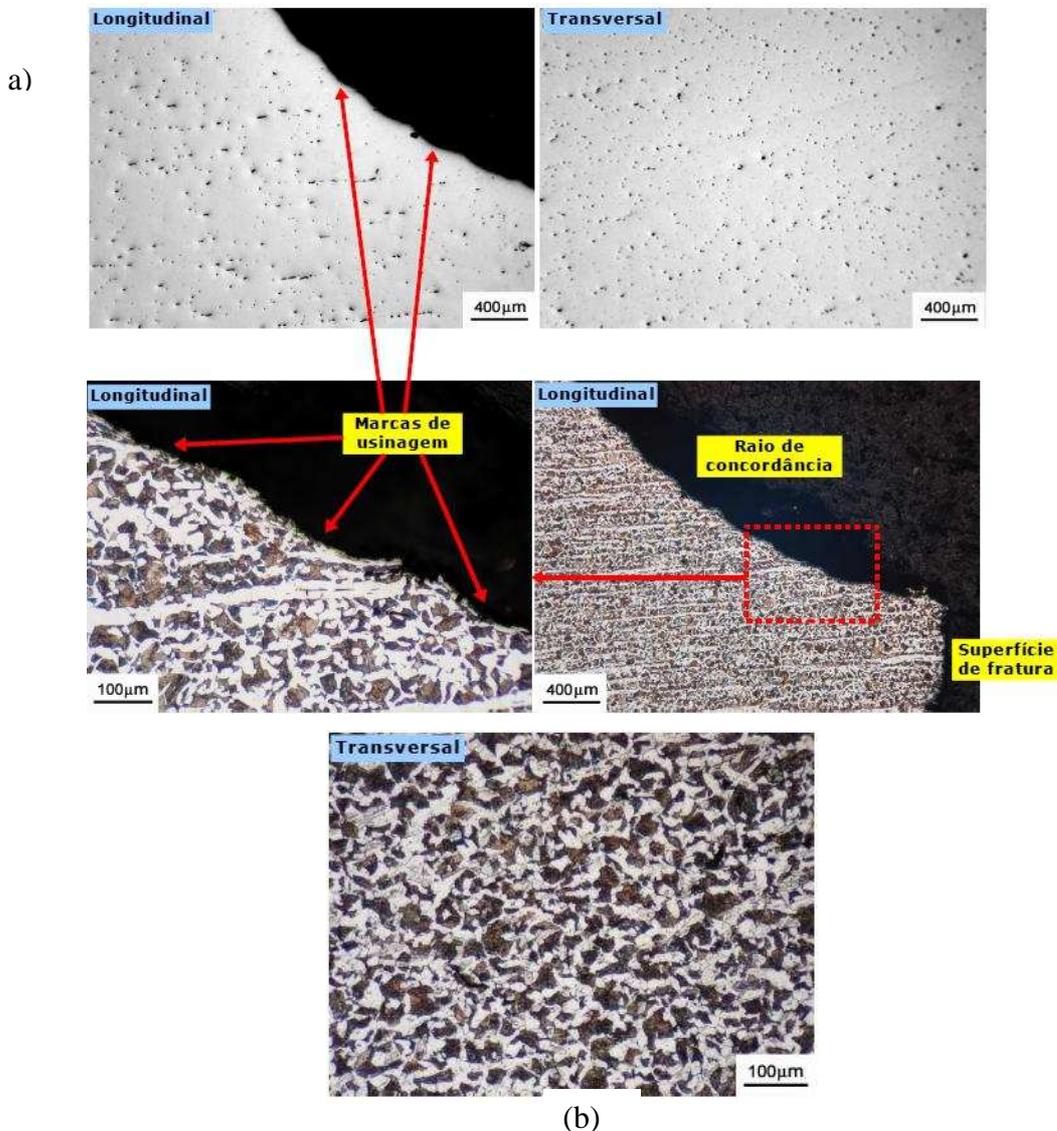


Figura 3 - Micrografia óptica (a) sem e (b) com ataque químico. O ataque utilizado foi Nital 2%.

### 3.5 Ensaio de Impacto

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de impacto. Os resultados são muito inferiores aos obtidos normalmente para o aço SAE 1040 na condição normalizada, mesmo levando-se em conta a diferença de orientação dos corpos de prova. É provável que a presença significativa de defeitos observada na análise metalográfica seja responsável pela redução das propriedades de impacto do material.

**Tabela 3** – Resultados dos ensaios de impacto

Amostra	Orientação	Energia(J)		
		Valores	Média	SAE 1040 normalizado 900°C
09-0015-003	T-L	10	10	65 (Izod, L-T)
09-0015-002		10		

### 3.6 Ensaio de Tração

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração. Apesar da diferença de orientação, os valores obtidos de resistência mecânica e ductilidade são muito inferiores aos valores típicos encontrados para o aço SAE 1040 na condição normalizada. Assim como para os resultados de impacto, acredita-se que a grande quantidade de defeitos e inclusões no material tenha contribuído de maneira significativa para a deterioração das propriedades.

**Tabela 4** – Resultados dos ensaios de tração

Amostra	Orientação	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	A (%)	RA (%)
09-0015-003	T-L	317,8	539,9	9,6	10,9
09-0015-004		308,6	543,9	6,7	9,6
<b>Média</b>		<b>313,2</b>	<b>541,9</b>	<b>8,2</b>	<b>10,3</b>
<b>SAE 1040, normalizado 900°C #</b>	<b>L-T</b>	<b>370</b>	<b>595</b>	<b>28</b>	<b>55</b>

$\sigma_e$  = limite de escoamento 0,2% offset;  $\sigma_r$  = limite de resistência à tração; A = alongamento em 4D; RA = redução de área

### 3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 4 apresenta detalhes das marcas de usinagem junto ao raio de concordância do eixo que aumentam o fator de concentração de tensão, facilitando a nucleação de trincas por fadiga.

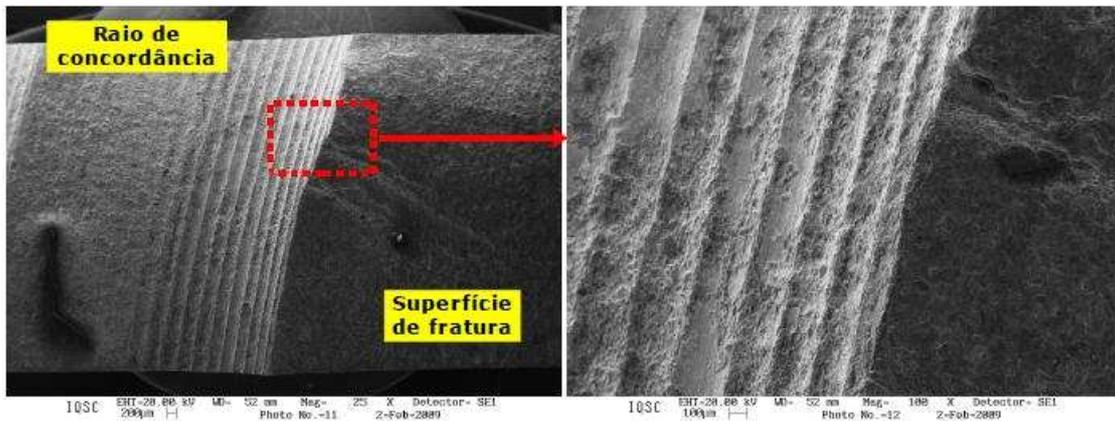


Figura 4 - Detalhes das marcas de usinagem no eixo.

## 4 CONCLUSÕES

O material do eixo apresentou composição química compatível com o aço SAE 1040. A análise micrográfica óptica mostrou uma microestrutura consistindo de ferrita e perlita. Os valores de dureza, de resistência mecânica, ductilidade e de resistência ao impacto são inferiores aos valores de referência tipicamente encontrados para o aço SAE 1040 na condição normalizada devido à grande presença de defeitos no material. Conclui-se que a falha do eixo ocorreu por um processo de nucleação e propagação de trinca por fadiga, a partir do raio de concordância do eixo.

## 5 RECOMENDAÇÕES

- Utilizar material de maior dureza/resistência mecânica, tal como o aço SAE 4340 temperado e revenido.
- Eliminar ou minimizar as marcas de usinagem no raio de concordância do eixo.
- Se possível, aumentar o raio de concordância do eixo.
- Verificar o alinhamento sistema de modo a minimizar a presença de momentos fletores.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASTM E 23 A (2002). American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials".
- 2 ASTM E A370 (2007). American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products".